

Deckung des Stromverbrauchs CH mit Photovoltaik, Wind- und Wasserkraft über das ganze Jahr

**Monatliche Berechnungen zur Energiestrategie 2050
basierend auf bestehenden Studien**

Prof. Dr. David Zogg

Mai 2023

Motivation

- In den letzten Wochen sind **zahlreiche Studien, Medienartikel und Infos** erschienen mit sehr unterschiedlichen Zahlen zur Energiewende, der Fokus lag auf der **Abstimmung am 18. Juni** über das **Klimaschutzgesetz**
- Ich wollte **selber überprüfen**, ob diese Zahlen stimmen können und **wie gross der Zubau von PV- und Windanlagen tatsächlich sein müsste**, um den Stromverbrauch der Schweiz vollständig mit erneuerbarer Energie decken zu können
- Die **Zunahme der Elektromobilität und Wärmepumpen** sollte in den Berechnungen berücksichtigt sein
- Es sollte **im Winter kein Stromimport mehr notwendig** sein und die Strategie sollte **auch ohne KKW**s aufgehen
- Im Gegensatz zu den meisten sonstigen Studien habe ich **Monatsbilanzen** angeschaut, und **Reserve über Speicherseen** (Wasserkraft) berücksichtigt
- Es geht in diesen Berechnungen **nicht um eine vollständige Energie-Autarkie** der Schweiz! Das wäre viel zu teuer. Vielmehr geht es um eine vernünftige Lösung mit vollständiger Deckung des zukünftigen Stromverbrauchs im Winter.

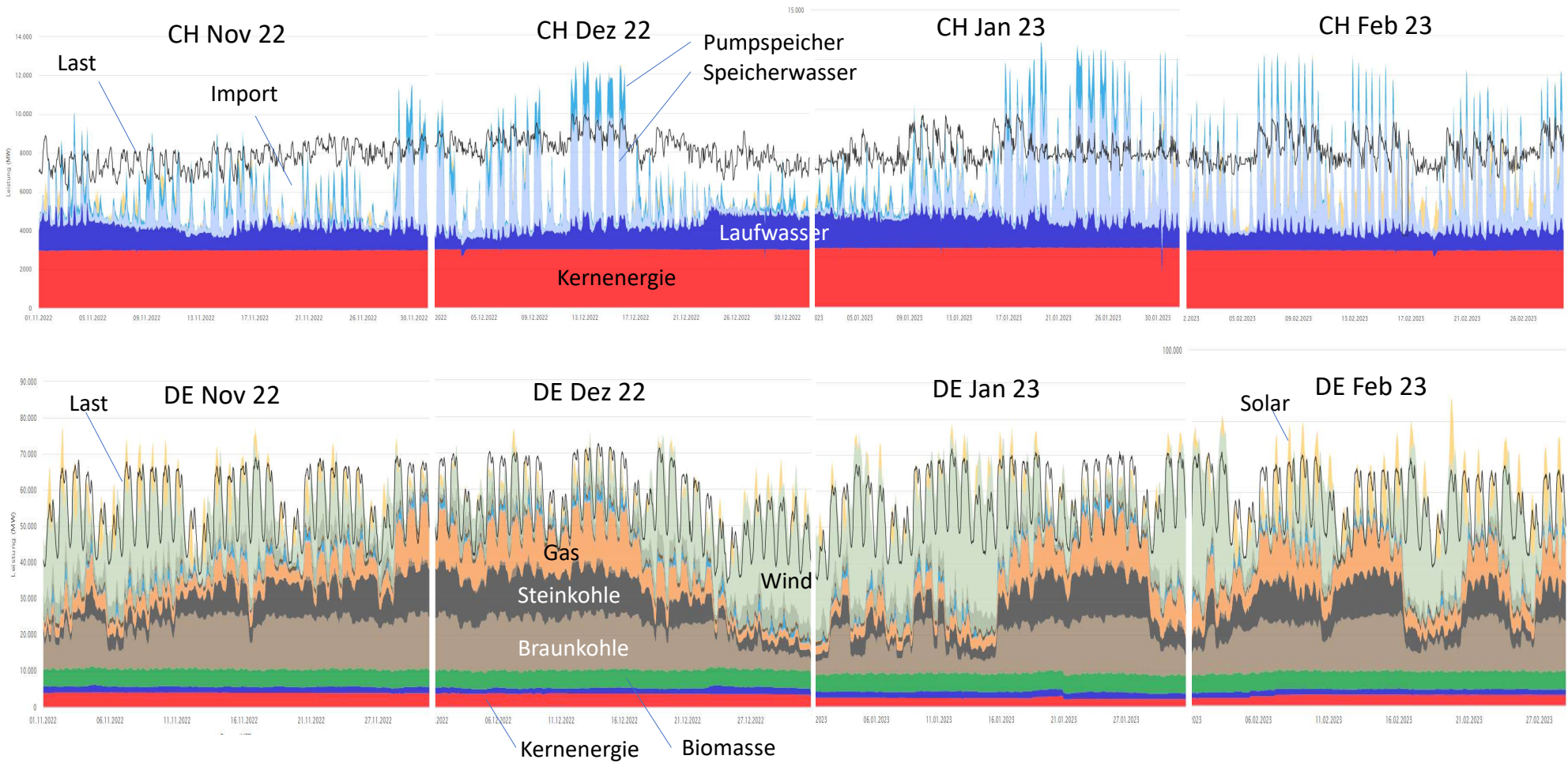
Grundsätzliche Überlegungen

Die Sonne liefert täglich 5'000x mehr Energie auf die Erde, als wir verbrauchen, auch wenn alle Menschen auf der Erde auf dem Stand eines Mitteleuropäers leben würden

- Dies zeigt, dass wir **eigentlich kein Energie-Problem** haben, sondern vielmehr ein **Energieverteilungsproblem**, also zeitliche und örtliche Verschiebungen von Produktion und Verbrauch.
- Bei diesem **hohen Überschuss** muss es aber **technische Möglichkeiten** geben, den Energiebedarf **vollständig erneuerbar** zu decken und auf endliche Ressourcen wie Öl und Gas aus dem Boden zu verzichten.
- Diese Überlegungen müssen **auch auf die Schweiz anwendbar** sein, obwohl wir hier sub-optimale Bedingungen haben

«Winterstromlücke» aktuell

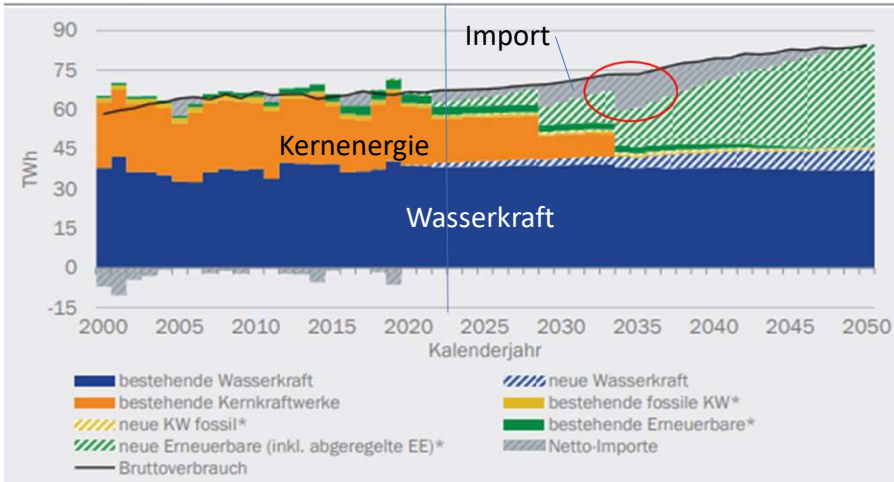
In den letzten 10 Jahren ca. 4 TWh Winter-Import (EiCom), Rekord bei fast 10 TWh im Jahre 2016/17



«Winterstromlücke» Prognose

Abbildung 18: Stromerzeugung nach Technologien

Entwicklung der jährlichen Stromerzeugung nach Technologien im Szenario ZERO Basis, Strategievariante «ausgeglichene Jahresbilanz 2050», in TWh



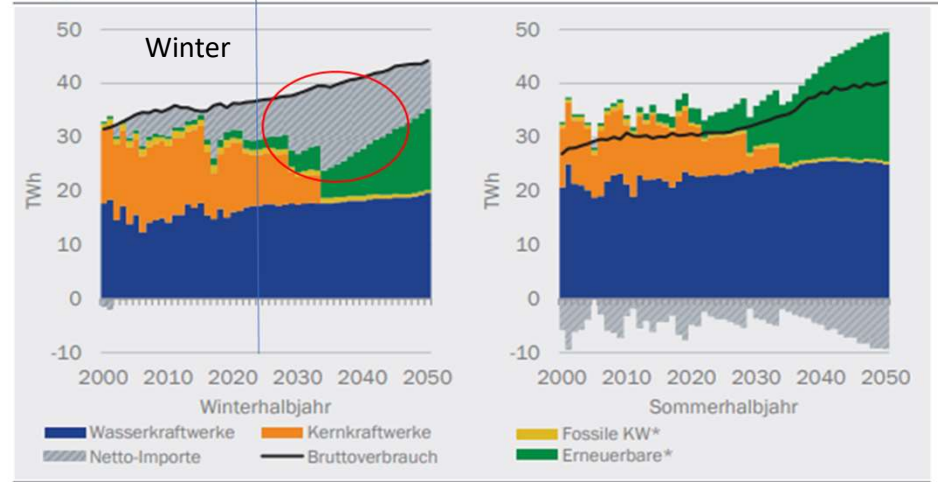
* gekoppelt und ungekoppelt

eigene Darstellung

© Prognos AG / TEP Energy GmbH / INFRAS AG 2020

Abbildung 20: Winter-/Sommerbilanz

Entwicklung der Bruttostromerzeugung im Winter- und Sommerhalbjahr im Szenario ZERO Basis, Strategievariante «ausgeglichene Jahresbilanz 2050», in TWh



* gekoppelt und ungekoppelt

eigene Darstellung

© Prognos AG / TEP Energy GmbH / INFRAS AG 2020

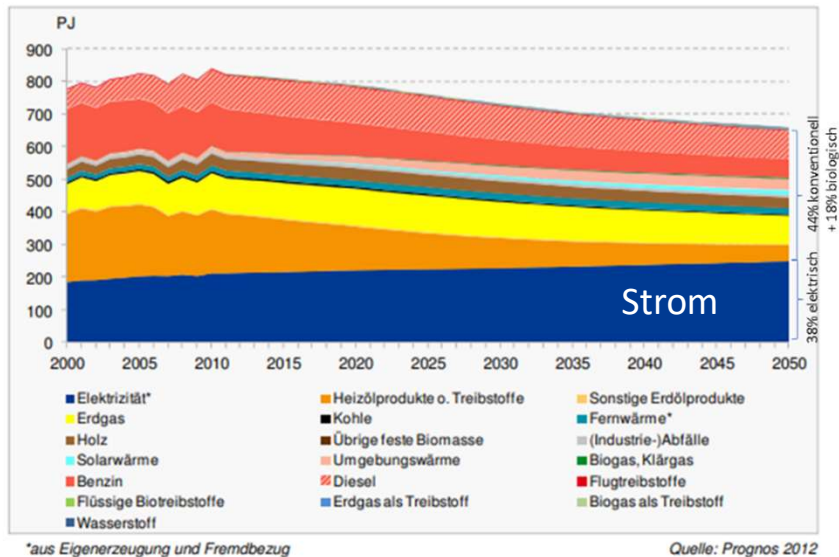
Prognos/BFE Jahresprognosen Strom:
Aktuelle Energieszenarien des Bundes basieren auf
Stromimport!

Aber: Auch andere Länder müssen im Winter importieren + seit 2022 Gas-Engpass in Europa!

Prognos/BFE Winterbilanz Strom:
Im Jahre **2035** steuern wir auf eine **Winterstromlücke**
von 15 TWh hin!

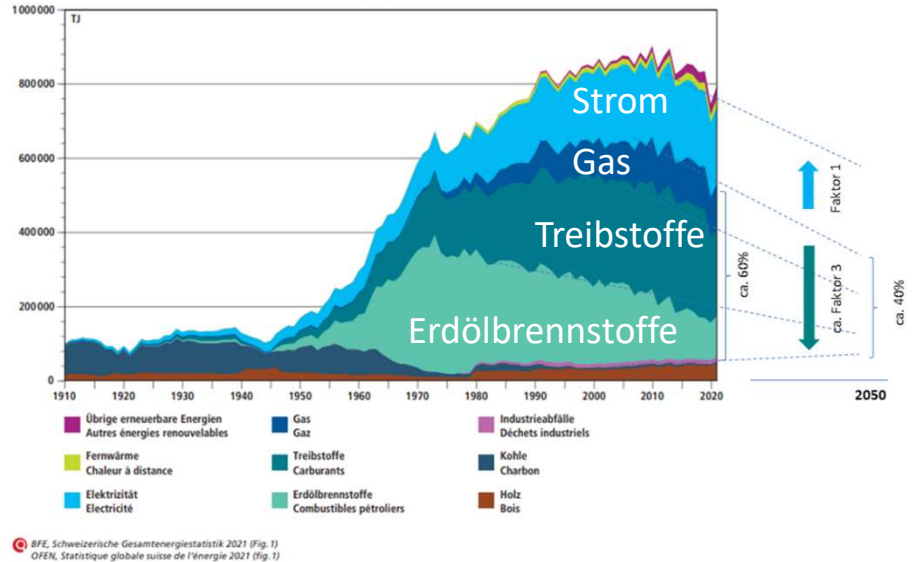
<https://www.bfe.admin.ch/bfe/de/home/politik/energieperspektiven-2050-plus.exturl.html/aHR0cHM6Ly9wdWJkYi5iZmUuYWRTaW4uY2gvZGUvchVibGljYX/Rpb24vZG93bmVvYWQvMTAzMjM=.html>

Figur 7-35: Szenario „Weiter wie bisher“
Endenergienachfrage nach Energieträgern, in PJ



Prognos/BFE Jahresprognosen Gesamtenergieverbrauch:
Verbrauch sinkend, Anteil Strom leicht zunehmend

Fig. 1 Endenergieverbrauch 1910–2021 nach Energieträgern
Consommation finale 1910–2021 selon les agents énergétiques



Gesamtenergiestatistik Bund:

Heute ca. 40% Strom, 60% Erdöl/Erdgas

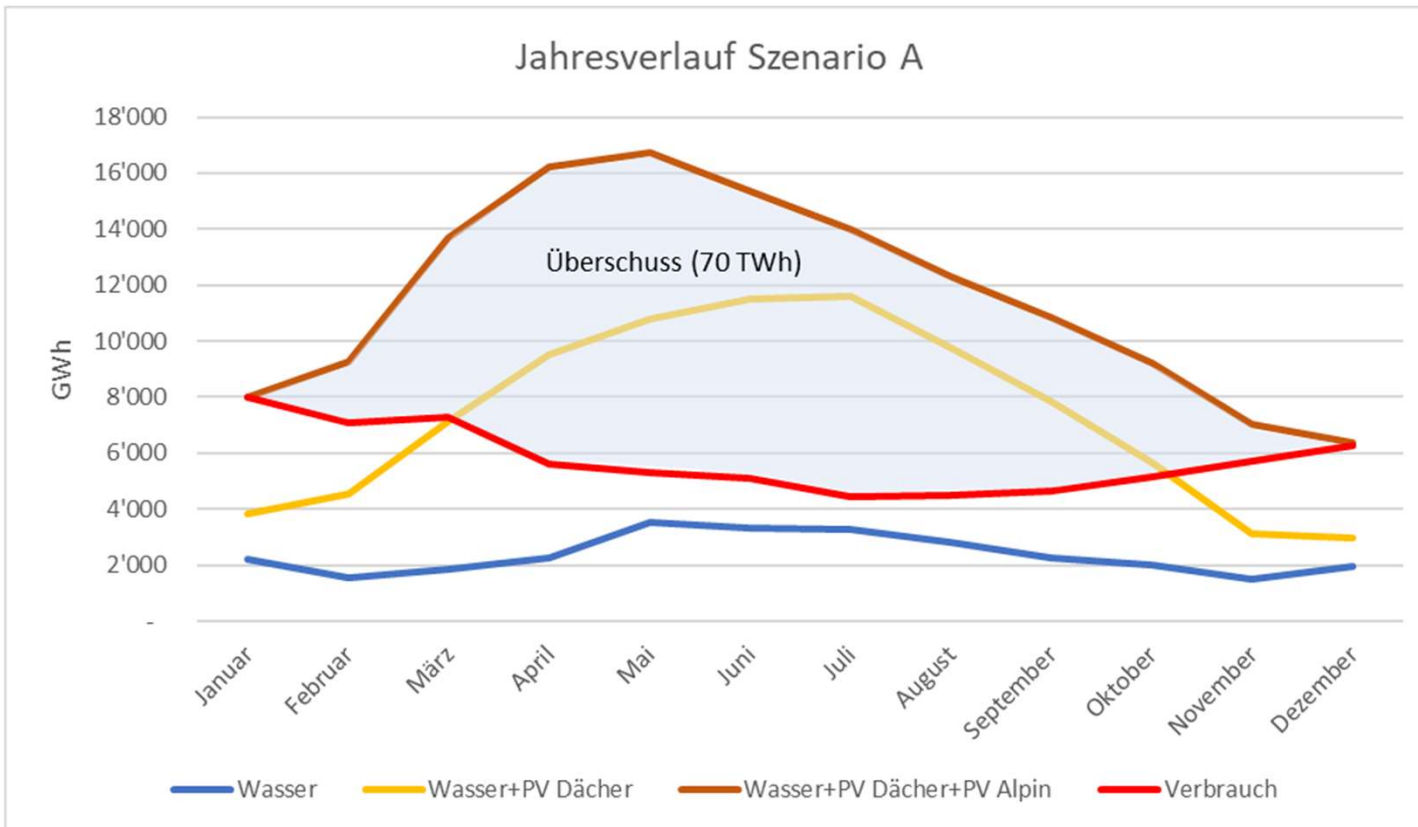
**In Zukunft 3x Erdöl/Erdgas mit 1x Strom ersetzen, wo möglich
Restliche Treib-/Brennstoffe «grün» importieren**

https://www.prognos.com/sites/default/files/2021-01/120912_prognos_bundesamt_fuer_energie_energieperspektiven_schweiz_2050.pdf

<https://www.bfe.admin.ch/bfe/de/home/versorgung/statistik-und-geodaten/energiestatistiken/gesamtenergiestatistik.exturl.html/aHR0cHM6Ly9wdWJkYi5iZmUuYWY2ZGUvcHVibGJiYX/Rpb24vZG93bmxvYWQvMTA5ODE=.html>

Monatsbilanzen Strom Szenario A

«PV Alpin + PV Mittelland + Wasserkraft»



Zukünftiger Stromverbrauch 2050 inkl. Zunahme Elektromobilität (2/3) und Wärmepumpen (75%)

Vollständige Deckung des Stromverbrauchs in jedem Monat (auch Wintermonate)

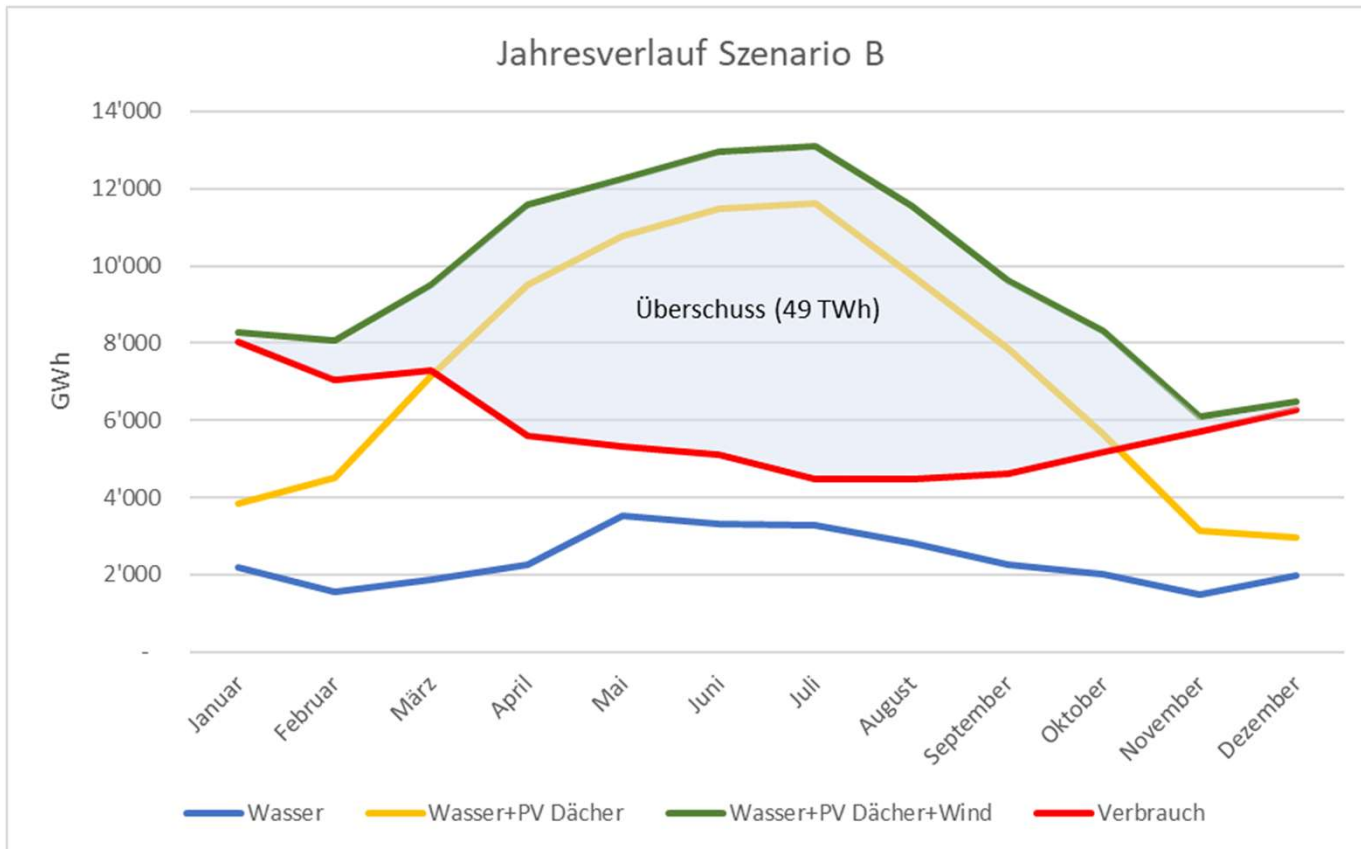
Als Basis alle geeigneten Dächer und Fassaden von Gebäuden mit PV
Wasserkraft in heutigem Zustand (Laufwasser + Speicherseen)

Wieviel zusätzliche Alpin-PV-Anlagen braucht es zur vollständigen Deckung?
→ 300 km², 6.4% veg.lose Fläche

→ Über das Jahr gesehen entsteht ein Überschuss von 70 TWh
→ 1.3 MT Wasserstoff, 52% der sonstigen Brenn-/Treibstoffe ersetzbar (Dekarbonisierung)

Monatsbilanzen Strom Szenario B

«Wind + PV Mittelland + Wasserkraft»



Zukünftiger Stromverbrauch 2050 inkl. Zunahme Elektromobilität (2/3) und Wärmepumpen (75%)

Vollständige Deckung des Stromverbrauchs in jedem Monat (auch Wintermonate)

Als Basis alle geeigneten Dächer und Fassaden von Gebäuden mit PV

Wasserkraft in heutigem Zustand (Laufwasser + Speicherseen)

Wieviel zusätzliche Windenergie-Anlagen braucht es zur vollständigen Deckung?

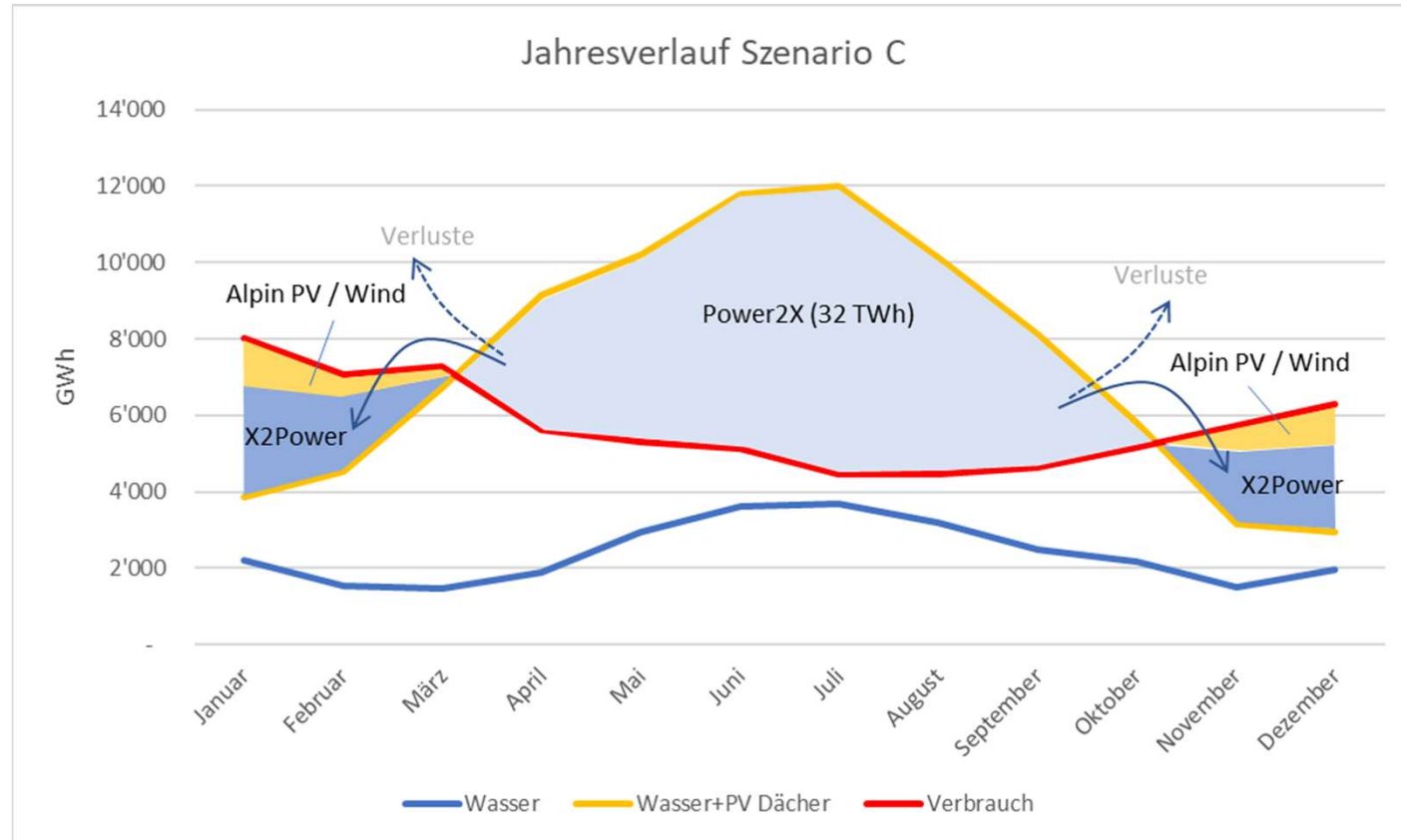
→ **4'400 WEA**

→ **Über das Jahr gesehen entsteht ein Überschuss von 49 TWh**

→ **0.9 MT Wasserstoff, 36% der sonstigen Brenn-/Treibstoffe ersetzbar (Dekarbonisierung)**

Monatsbilanzen Strom Szenario C

«Power2X + PV Alpin + PV Mittelland + Wasserkraft» Prof. Dr. David Zogg



Zukünftiger Stromverbrauch 2050 inkl. Zunahme Elektromobilität (2/3) und Wärmepumpen (75%)

Vollständige Deckung des Stromverbrauchs in jedem Monat (auch Wintermonate)

Als Basis alle geeigneten Dächer und Fassaden von Gebäuden mit PV

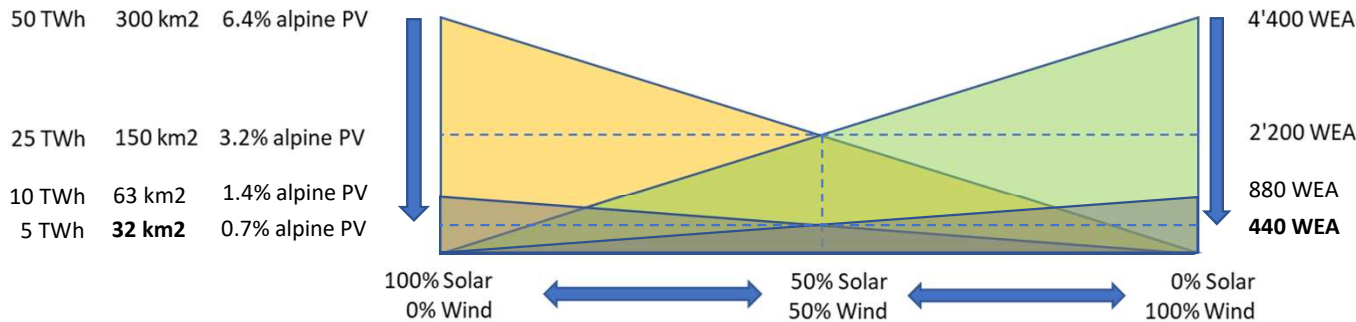
Wasserkraft leicht optimiert (Laufwasser + Speicherseen)

Ist eine vollständige Deckung mit dem Sommerüberschuss möglich trotz hoher Verluste von 70%?

- ja, fast
- Es braucht nur noch 63 km² PV-Alpin (1.4% veg.l.FI.)
- Also ca. 5x weniger!
- Speicherung von 3.8 Mio m³ Methanol in Pflichtlagern (4 Mio.)

Kombination der Szenarien

Szenario	Alpine PV (% Fläche)	Wind (Anzahl WEA)	Überschuss	Saisonspeicher
	Speicherseen optimiert und Lastmanagement		Wasserstoff	Mio m3 Methanol
A: PV Alpin + PV Mittelland + Wasserkraft	300 km ² (6.4%, 50 TWh)	-	1.3 MT (70 TWh)	
B: Wind + PV Mittelland + Wasserkraft	-	4400 (30 TWh)	0.9 MT (49 TWh)	
C: Power2X + PV Alpin + PV Mittelland + Wasserkraft	63 km ² (1.4%, 10 TWh)	-	-	3.8 (32 TWh)



Es muss ein praktikabler Kompromiss gefunden werden

Wahl zwischen Solar- und Windanteil

Maximalvariante («AlpinTec»)

→ 150 km² PV-Alpin (3.2% veg.I.FI.)

und 2'200 Windenergieanlagen (WEA)

→ Strom 100% gedeckt, mit Überschuss

→ 44% der sonstigen Brenn-/Treibstoffe ersetzbar (Dekarbonisierung)

Massive Reduktion der benötigten PV-/Windanlagen durch Power2X

Minimalvariante

→ **32 km² PV-Alpin (0.7% veg.I.FI.)**

und 440 Windenergieanlagen (WEA)

→ **Strom 100% gedeckt, ohne Überschuss**

→ **Mit einem intelligenten «Technologiemix» konnten die Extrem-Zahlen um einen Faktor von 10 reduziert werden!**

Lösung auf einen Blick «Minimalvariante»

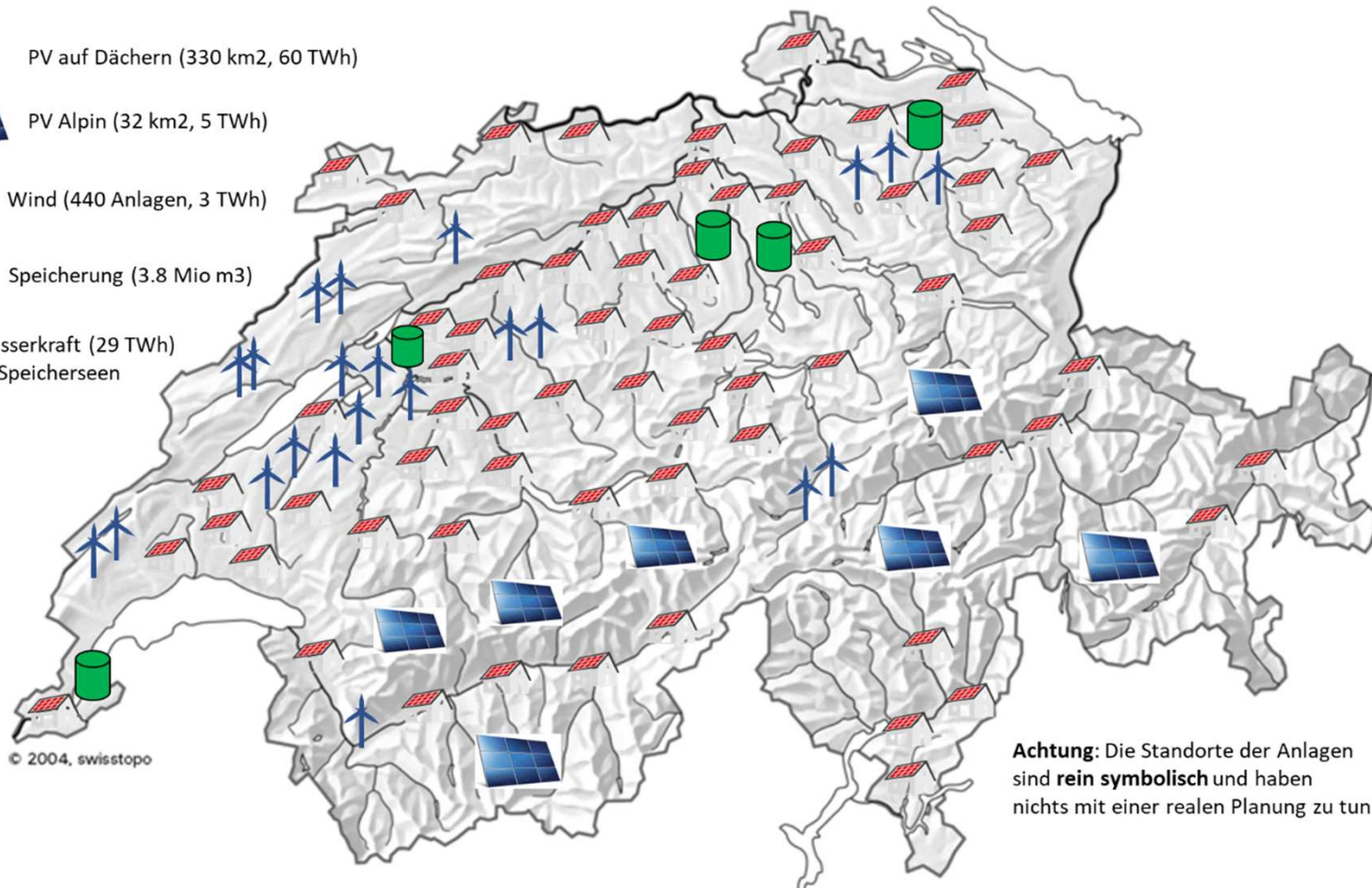
 PV auf Dächern (330 km², 60 TWh)

 PV Alpin (32 km², 5 TWh)

 Wind (440 Anlagen, 3 TWh)

 Speicherung (3.8 Mio m³)

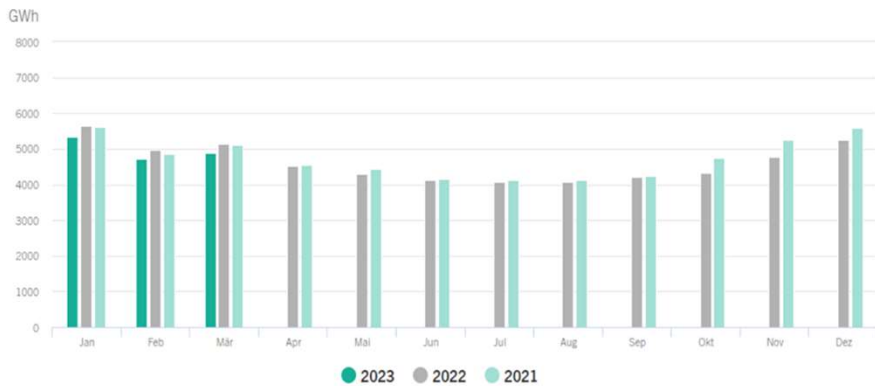
+ Wasserkraft (29 TWh)
inkl. Speicherseen



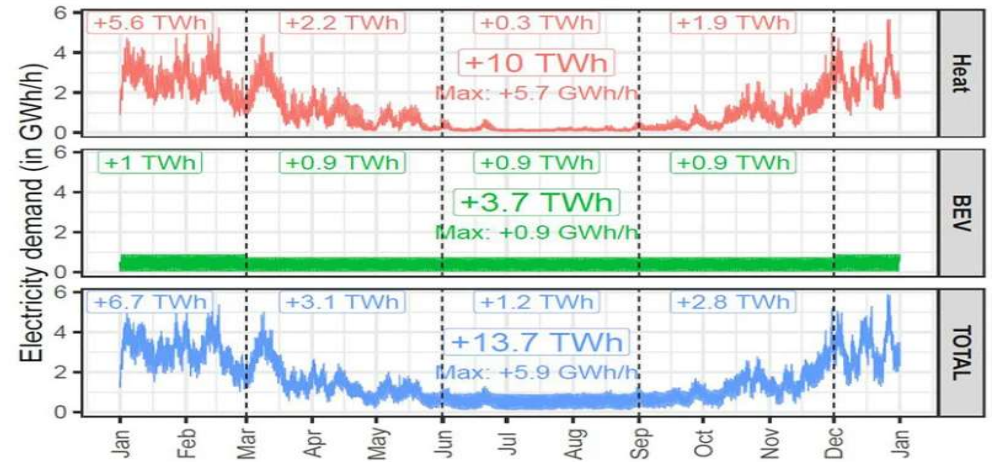
© 2004, swisstopo

Achtung: Die Standorte der Anlagen sind **rein symbolisch** und haben nichts mit einer realen Planung zu tun!

Entwicklung Stromverbrauch bis 2050



Swissgrid Netzdaten:
Basis heute **55 TWh**



Studie EMPA:

Steigung Stromverbrauch durch **Zubau von Wärmepumpen** (Heat, 75%) und **Elektromobilen** (BEV, 2/3) über den Jahresverlauf
Summe +13.7 TWh → **ca. 70 TWh** im Jahre **2050**

Wärmepumpen laufen vorwiegend im Winter

Elektromobile über das ganze Jahr verteilt

Ersatz von Elektroheizungen und Effizienzmassnahmen berücksichtigt

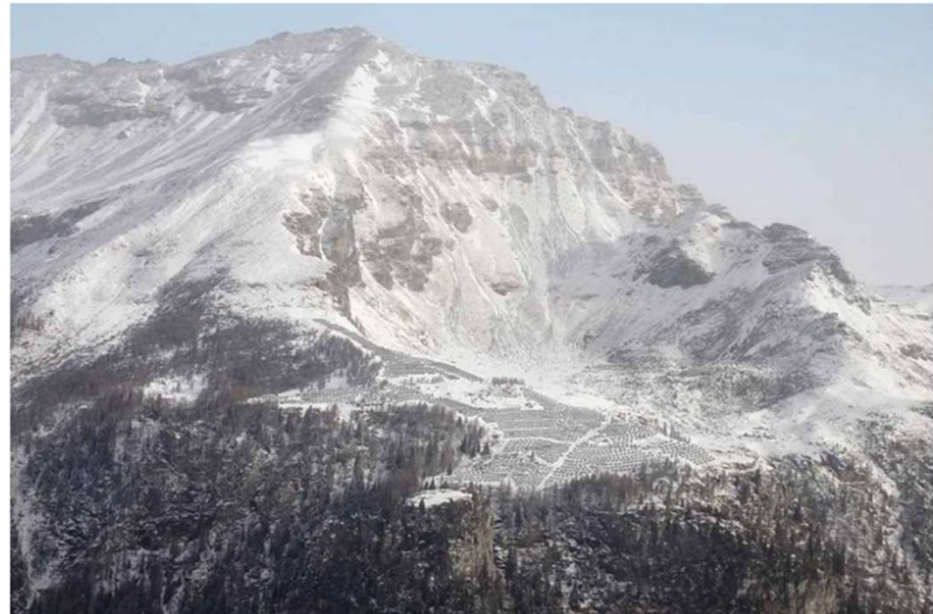
<https://www.swissgrid.ch/de/home/operation/grid-data/generation.html>

<https://www.mdpi.com/1996-1073/12/12/2399/pdf>



Davos-Totalp ZHAW:

Versuchsanlage in den Alpen
Verschiedene Neigungswinkel und Art der Module
→ 90° bifazial am besten geeignet (Schnee)



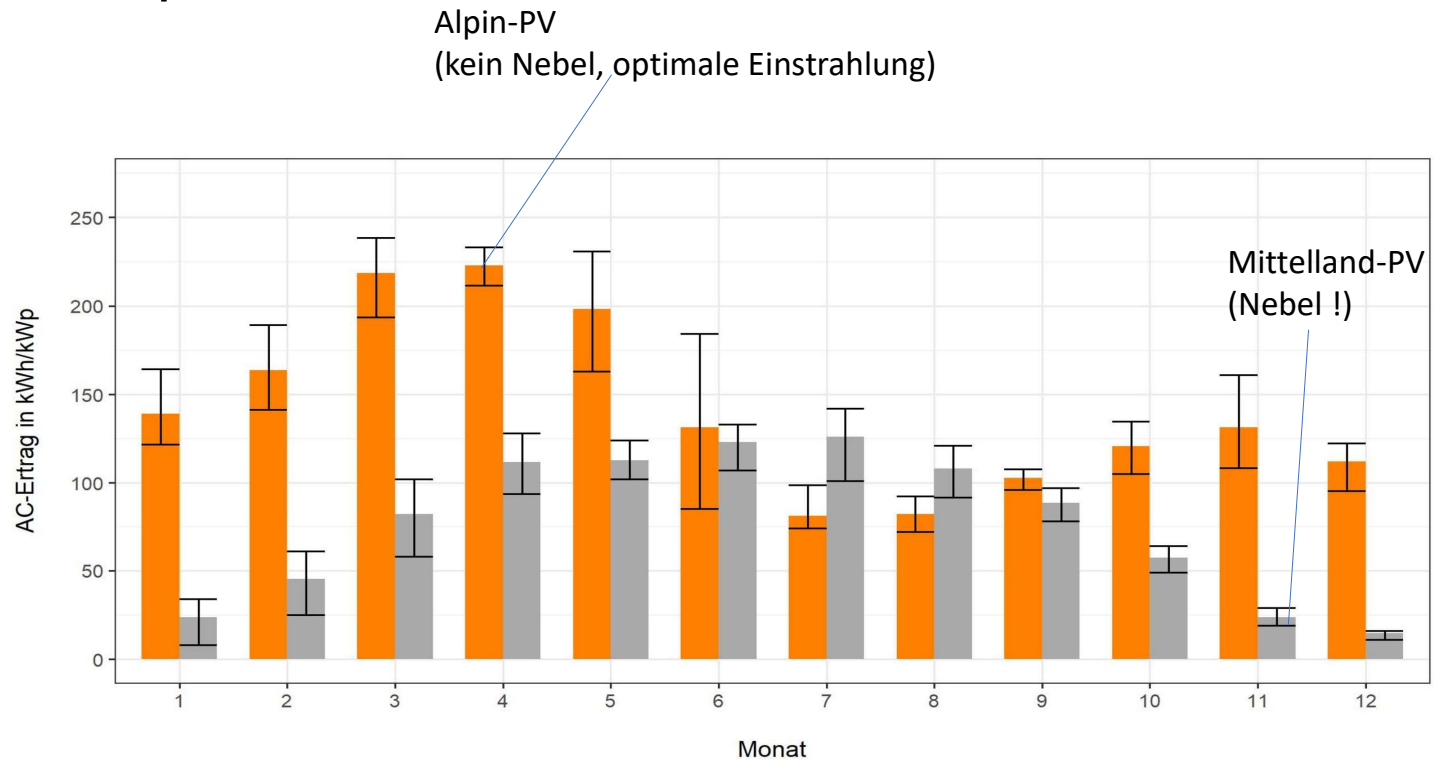
Gondosolar (Projekt):

100'000 m² (0.1 km²), 18 MW Leistung,
23 GWh Jahresproduktion, 55% im Winter
Stromleitungen unterirdisch, optimal in Landschaft integriert

<https://www.zhaw.ch/de/Isfm/institute-zentren/iunr/oekotechnologien-energiesysteme/erneuerbare-energien/solarenergie/alpenstrom-davos/>

<https://www.gondosolar.ch/>

Alpin-PV



Jahresproduktion:

Alpin 1'700...1'850 kWh/kWp

Mittelland ca. 1'000 kWh/kWp

90° bifazial Wädenswil 20°/30° monofazial



«Winterstrom für die Schweiz», Energie Schweiz

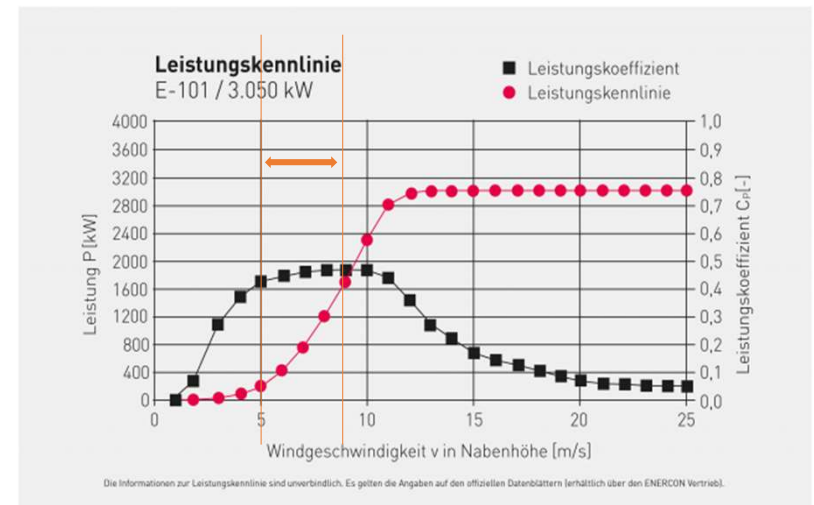
<https://pubdb.bfe.admin.ch/de/publication/download/8037>

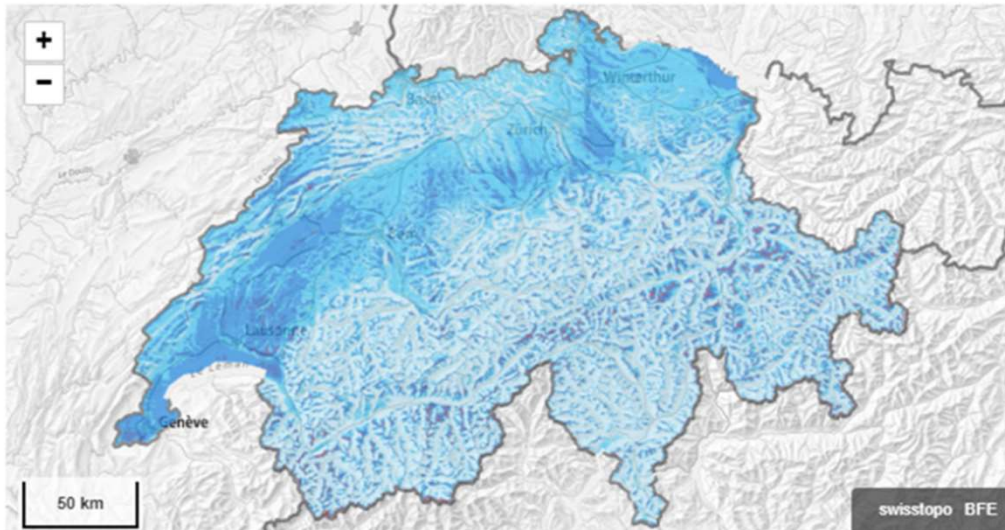
Potential CH:

Mittelland 20 TWh Jahresproduktion (1'979 WEA)
 Jura + Alpentäler 9 TWh Jahresproduktion (1'173 WEA)
 Alpen 5 TWh Jahresproduktion (1'287 WEA)
 Insgesamt 34 TWh Jahresproduktion (4'439 WEA)
 WEA = Windenergieanlage

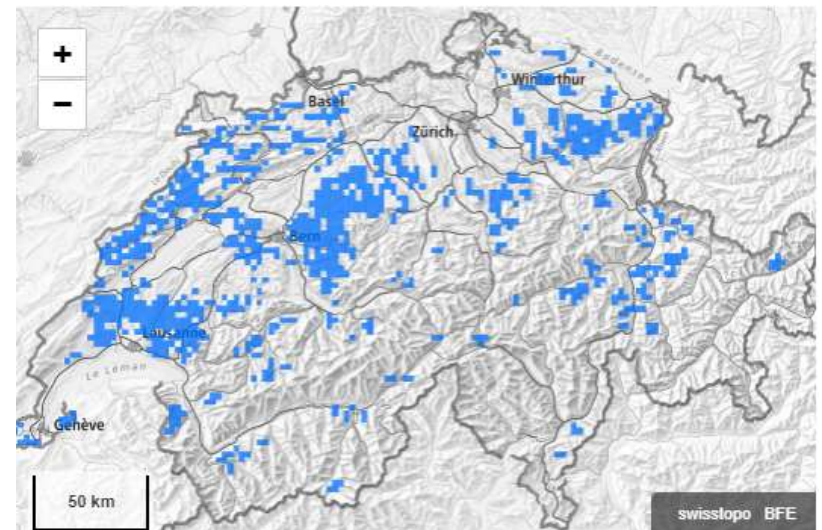
Anlagengrößen:

Mittelland 5.5 MW, 150 m Nabenhöhe
 Jura + Alpentäler 4.2 MW, 150 m Nabenhöhe
 Alpen 2.3 MW, 100 m Nabenhöhe



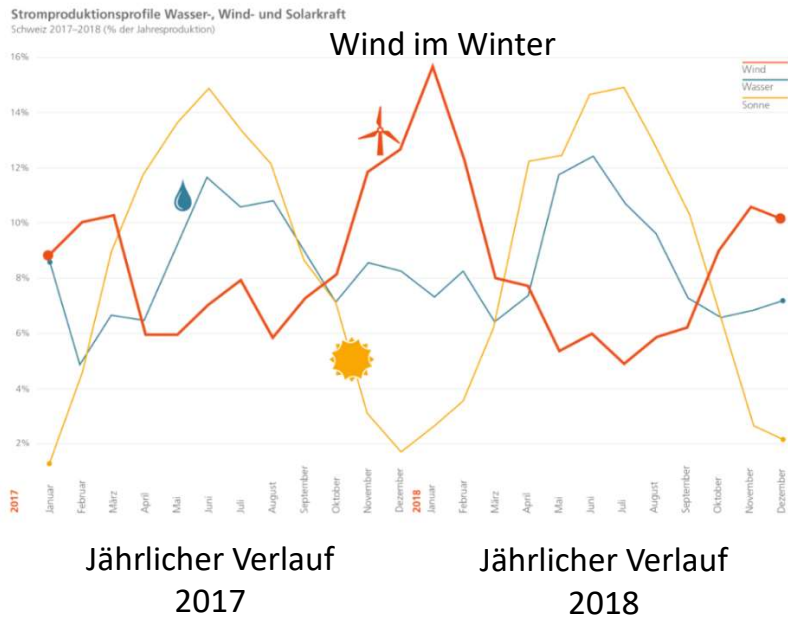


Aktuelle Windkarte Schweiz (Windgeschwindigkeiten):
Westliches Mittelland am besten geeignet!



Windpotentialgebiete (Windatlas Schweiz, BFE):
Berücksichtigung der Bundesinteressen
(Bauzonen, Schutzgebiete, usw.)

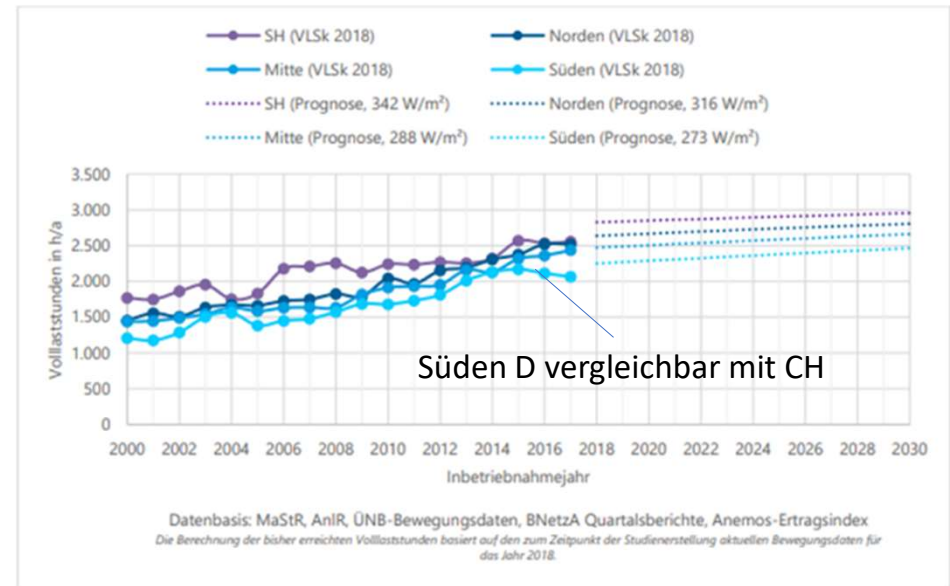
https://www.uvek-gis.admin.ch/BFE/storymaps/EE_Windatlas/?lang=de



2020 ca. 40 WEA CH

Wind hat ca. **2/3 der Produktion im Winter** (Okt-März)
(wenn das Mittelland oft im Nebel liegt)

<https://pubdb.bfe.admin.ch/de/publication/download/8037>



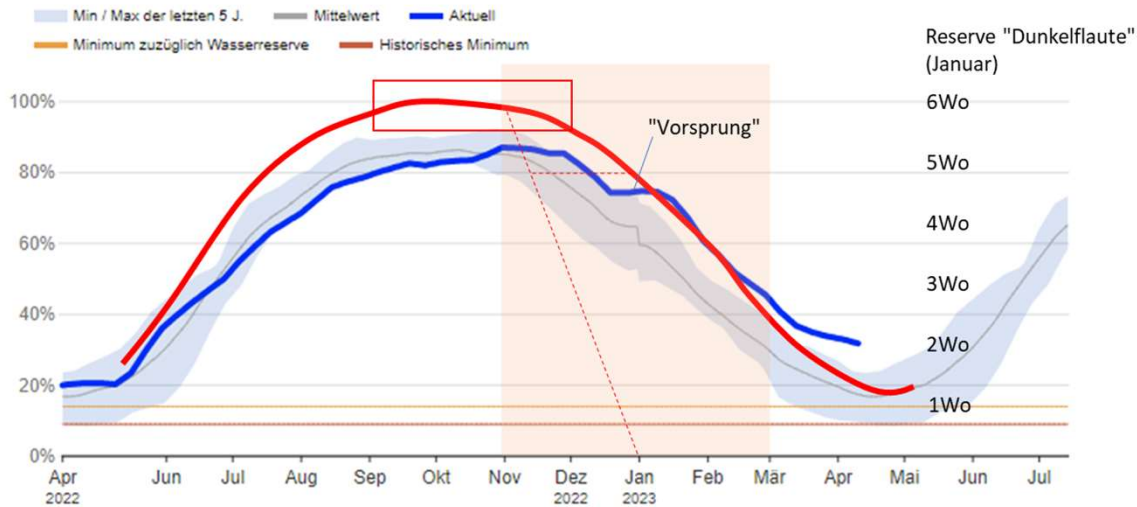
2022 ca. 30'000 WEA DE

Bundesverband Windenergie Deutschland:
Entwicklung der Volllaststunden von WEA
2'500 Volllaststunden im Jahre **2030** erwartet
Technologische Entwicklung!

https://www.windguard.de/veroeffentlichungen.html?file=files/cto_layout/img/unternehmen/veroeffentlichungen/2020/Volllaststunden%20von%20Windenergieanlagen%20an%20Land%202020.pdf

Energieinhalt der Schweizer Stauseen je Kalenderwoche und Wasserkraftreserve

Wöchentliche Aktualisierung - Stand 10.04.2023



<https://energiedashboard.admin.ch/strom/fuellstaende-speicherseen>



Speicherfüllstände im Jahresverlauf:

grau: durchschnittlicher Verlauf

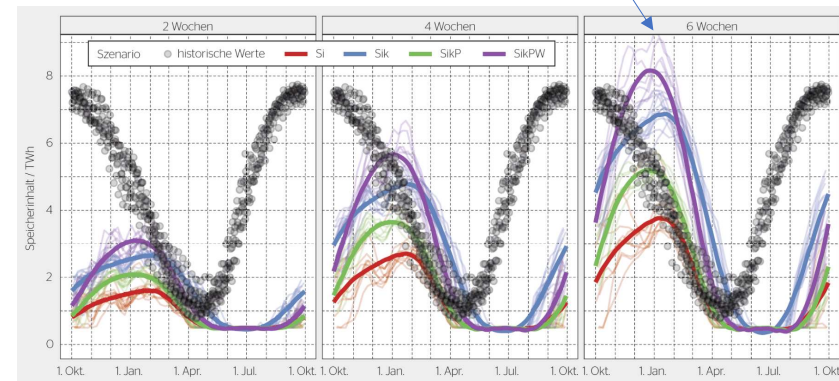
blau: 2022/23 mit Wasserkraftreserve

rot: mögliche Optimierung mit max. Füllstand

Plus intelligentes Lastmanagement:

Batteriespeicher, Elektromobile V2G, Wärmepumpen, Gebäude als Speicher, usw.

Benötigter Füllstand für 6 Wochen «kalte Dunkelflaute» gemäss Studie VSE / BKW / CKW



<https://www.bulletin.ch/de/news-detail/mit-speicherwasser-gegen-die-dunkelflaute-1995.html>

Kostenschätzungen sind immer mit grossen Unsicherheiten behaftet!

Gestehungskosten = Investitionen und Betriebskosten, über die Lebensdauer amortisiert (auf kWh-Preise umgerechnet)

Auch konventionelle Kraftwerke brauchen Erneuerungen und Unterhalt!

Tabelle 2: Gestehungskosten für neu gebaute Stromproduktionsanlagen für erneuerbare Energien in der Schweiz (in Rp./kWh) sowie offshore Windenergie im Ausland.

Technologie	Neuanlagen		
	heute	2035	2050
Grosswasserkraft ⁹	7-30	7-30	7-30
Kleinwasserkraft	12-28	14-33	14-34
Windenergie Schweiz	13-21	10-17	9-15
Windenergie offshore	13-27	12-23	10-20
Fotovoltaik: 10 kW	18-31	9-22	8-19
1000 kW	8-13	4-10	3-9
Holz-BHKW ¹⁰	18-36	18-41	18-45
Landwirtschaftliche Biogasanlagen ¹¹	20-49	18-50	16-51
Tiefengeothermie ¹²	nicht vorhanden	16-58	13-47

BFE Stromgestehungskosten für **erneuerbare Energien**

→ Windenergie und PV-Grossanlagen haben die tiefsten Gestehungskosten!

<https://www.newsd.admin.ch/newsd/message/attachments/50263.pdf>

Tabelle 3: Gestehungskosten für neu gebaute Stromproduktionsanlagen für konventionelle Energien, vorwiegend im europäischen Ausland (in Rp./kWh)¹³.

Technologie	Neuanlagen		
	heute	2035	2050
Kernenergie	5.1-12.5 ¹⁴	5.1-12.2 ¹⁵	k.A. ¹⁶
Gaskombikraftwerke GuD	10.8-12.3	12.9-14.2	14.5-16
GuD mit CO ₂ -Abscheidung	nicht vorhanden	15.3-17.7	17.3-19.8
Erdgas-BHKW: 10 kW _{el}	22-45	23-45	23-45
1000 kW _{el}	10-15	12-17	17-20
Brennstoffzellen: 1 kW _{el}	65-125	23-64	19-46
300 kW _{el}	22-70	14-37	13-24
Kohlekraftwerke (Ausland)	3.9-8.3	4.2-8.7	4.4-8.9
Kohle mit CO ₂ -Abscheidung	nicht vorhanden	6.3-10.4	5.5-10.6

¹³ Die angenommenen Brennstoffkosten (Erdgas und Kohle) beziehen sich auf die Schweiz.

¹⁴ Neue Gen III/III+ Reaktoren wie sie heute vorwiegend in Asien (China, Südkorea u.a.) gebaut werden.

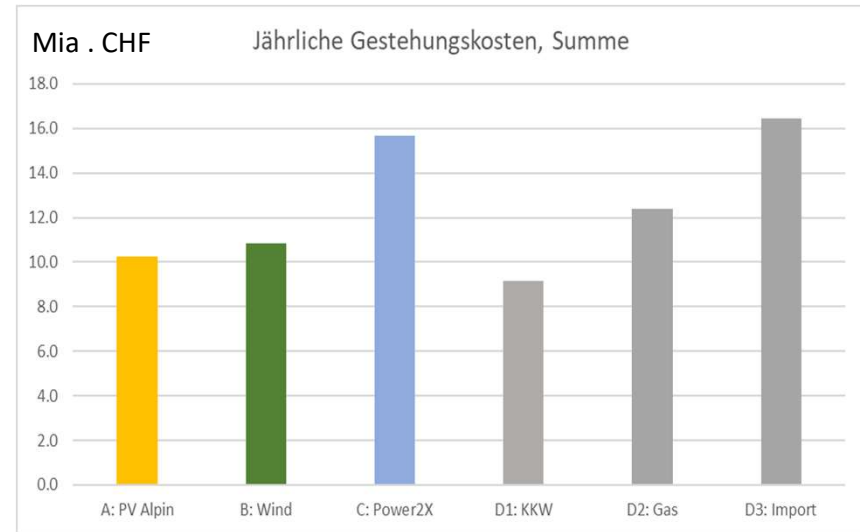
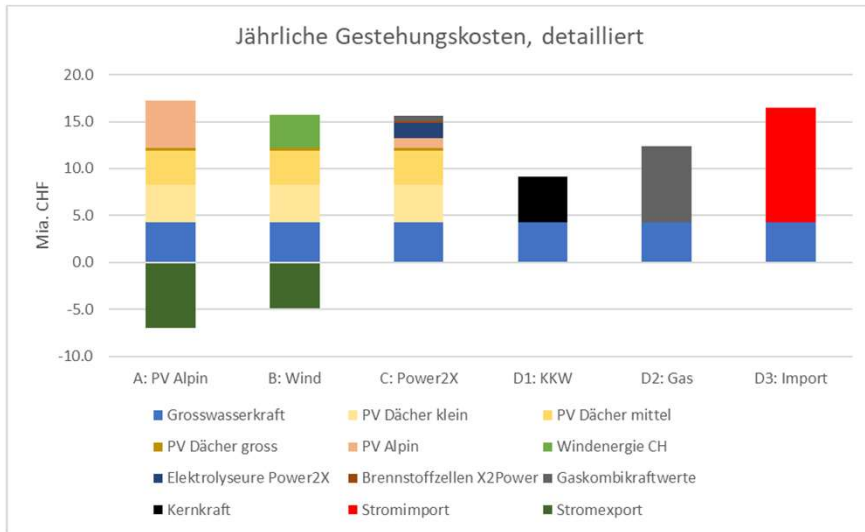
¹⁵ Gen III(+) oder Small modular reactors (SMR).

¹⁶ Mangels verlässlicher Daten sind keine Schätzungen für Generation IV im Jahr 2050 möglich.

BFE Stromgestehungskosten für **konventionelle Energien:**

→ keine externen Kosten wie Schäden an Umwelt, Mensch und Tier berücksichtigt

Gestehungskosten



Jährlichen Gestehungskosten, detailliert (Mia. CHF):
 → KKW sieht auf den ersten Blick am «günstigsten» aus
 → Bei Szenarien «PV Alpin» und «Wind» sind jedoch Strom-/Energieexporte möglich (10 Rp/kWh angenommen)

Summe der jährlichen Gestehungskosten:
 → **Erneuerbare Energien sind nicht teurer als konventionelle!**
 → Power2X ist etwas kostspieliger, es braucht noch Entwicklungsarbeit

Kosten/Nutzen/Risiko-Analyse

Vergleich der Szenarien	A: PV Alpin	B: Wind	C: Power2X ⁰⁾	D1: KKW ¹⁾	D2: Gas ²⁾	D3: Import ³⁾
Jährliche Gestehungskosten in Mia. CHF (Basis 2050)	10.2	10.8	15.6	9.2	12.4	16.4
Jährliche Gestehungskosten pro Bewohner in CHF ⁴⁾	1'024	1'083	1'565	916	1'240	1'645
Technologie-Import	CHN/EU	EU	EU	USA/EU	USA/EU	USA/EU
Energie-Import					RUS/USA?	EU
Energie-Export	EU	EU				
Wertschöpfung CH	gross	gross	gross	tief	tief	tief
Unabhängigkeit	gross	gross	mittel	mittel	tief	tief
Risiko für Gesellschaft und Natur	tief	tief	mittel	hoch	mittel	
Rückbaubarkeit und Recycling	hoch	hoch	mittel	tief	mittel	
Flexibilität, Regelbarkeit	tief	tief	hoch	tief	hoch	

⁰⁾ Bei Power2X ist die Preisentwicklung sehr unsicher und die Datenbasis noch unvollständig. Die Kosten werden in Zukunft sinken.
¹⁾ Bei der Kernkraft sind die gesellschaftlichen Risiken eines GAUs nicht mit eingerechnet
²⁾ Bei den Gaskraftwerken sind die Preissteigerungen durch geopolitische Verwerfungen nicht mit eingerechnet
³⁾ Beim Stromimport wird von massiven Preissteigerungen ausgegangen wegen allgemeiner Mangellage im Winter im europäischen Raum
⁴⁾ Bei einer Bevölkerungszahl der CH von 10 Mio. Einwohnern (2050)

→ Der Vorteil der erneuerbaren Energien liegt in deren Unabhängigkeit, Wertschöpfung, tiefem Risiko und Klimaschutz!

Bei sich selber beginnen



Haus:

- Baujahr 1930, verschiedene Sanierungen
- 4 PV-Anlagen Ost/West/Garage/Balkon für alle Jahreszeiten
- 1 thermische Solaranlage für Warmwasser
- 1 Li-Ion-Batterie für tägliche Pufferung, 1 Blei-Akku für Notstrom
- 1 Luft/Wasser-Wärmepumpe, 1 kleine Klimaanlage für Sommer
- 2 Energiemanagement-Systeme (Haus und Garage kommunizierend)

→ Von März bis Oktober vollständig erneuerbar!
Im Winter geht es aber nicht ohne Netzbezug!
Dieses Problem muss übergeordnet gelöst werden!
Deshalb wurden die Berechnungen durchgeführt!

Garage:

Elektromobilität März-Oktober 100% solar
(Plug-In-Hybrid jetzt durch vollelektrischen Kleinwagen ersetzt)



- **100% Deckung des Stromverbrauchs** mit erneuerbarer Energie ist möglich, auch in den Wintermonaten
- Dank **Power2X**-Technologie kann ein grosser Teil des Sommerüberschusses in den Winter transferiert werden
- Dadurch kann der **Zubau von Wind und Alpin-PV massiv reduziert** werden → 440 WEA, 0.7% Alpin-PV
- Jede **weitere WEA bzw. PV-Anlage** kann mithelfen, die **restlichen Sektoren zu Dekarbonisieren**
- Erneuerbare Energie ist **nicht teurer, aber schafft Unabhängigkeit und Arbeitsplätze** im Inland
- Bei erneuerbarer Energie sind die **Risiken für Gesellschaft und Umwelt wesentlich geringer**
- Dank erneuerbarer Energie schaffen wir den **Klimaschutz** und das **Netto-Null-Ziel 2050**
- Der geplante **Ersatz durch Wärmepumpen und Elektromobile** kann **über erneuerbare Energien gedeckt** werden
- Zudem **verringern diese Technologien den Gesamtenergieverbrauch** bis zu einem Faktor von 3

Kurzversion Berechnungen:

https://smart-energy-engineering.ch/wp-content/uploads/2023/05/Studie_Deckung_Stromverbrauchs_CH_erneuerbar_Zogg_20230514_Kurzversion.pdf

Vollversion Berechnungen:

https://smart-energy-engineering.ch/wp-content/uploads/2023/05/Studie_Deckung_Stromverbrauchs_CH_erneuerbar_Zogg_20230514_Vollversion.pdf